

蒸汽轮机通流部分结垢对运行效率的影响

于逸天

大唐惠州热电有限责任公司 广东 惠州 516123

【摘要】：蒸汽轮机通流部分长期处于高温、高压及高速蒸汽冲刷环境，蒸汽携带的盐类、氧化物及杂质容易在喷嘴、叶片和隔板表面沉积。结垢会改变叶型轮廓及流道面积，引起蒸汽流动阻力增大、级效率下降、轴向推力异常和机组出力受限。依据通流参数变化及垢层形成规律，构建压差、温度、流量、热耗率协同诊断方法，并从蒸汽品质控制、运行调整、在线清洗和检修除垢等方面实施治理。相关措施能够减小通流损失，恢复叶片气动性能，降低热耗水平，提高蒸汽轮机运行效率及设备稳定性。

【关键词】：蒸汽轮机；通流部分；结垢特征；运行效率；清洗治理

DOI:10.12417/2705-0998.26.11.064

引言

蒸汽轮机承担着蒸汽热能向机械能转换的核心任务，通流部分的气动状态直接影响机组出力及热耗水平。运行期间，蒸汽中的硅酸盐、钠盐、铁氧化物等杂质会在压力和温度变化过程中析出，并逐渐附着于喷嘴、动叶、静叶及隔板表面。垢层厚度增加后，叶片表面粗糙度明显上升，流道有效截面积缩小，蒸汽流速、反动度和级间压比分配随之偏离设计状态。部分结垢还会造成转子轴向推力变化、叶片振动加剧及调节级压力异常，仅依靠常规参数判断难以及时确定故障程度。准确分析结垢位置、沉积类型及效率损失关系，是制定蒸汽品质控制、负荷调整、清洗除垢和检修维护方案的关键基础。

1 通流部分结垢形成特征及运行表征

1.1 蒸汽杂质析出沉积机理

高温高压蒸汽进入通流部分后，压力、温度及流速持续变化，蒸汽中溶解或夹带的硅酸盐、钠盐、铁氧化物等杂质会因溶解度下降发生析出。析出颗粒随蒸汽流动迁移，在喷嘴出口、叶片前缘及压力梯度较大的区域形成初始附着层。初始沉积会提高金属表面粗糙度，增强后续颗粒的捕集能力，使垢层由疏松附着逐步转变为致密沉积。蒸汽湿度波动、给水品质偏差及启停过程中的温压变化会加快沉积速率，导致结垢范围向后级扩展，并对通流面积和叶片型线产生持续影响。

1.2 叶片垢层分布形态特征

叶片垢层通常呈现明显的区域差异，沉积位置受蒸汽流向、叶型曲率、表面温度及局部流场共同影响。静叶进口边缘容易形成条带状沉积，动叶压力面多出现片状或层状垢层，叶顶、叶根及汽封邻近区域则可能形成局部聚集。高压级沉积物颗粒较细、附着紧密，中低压级受湿蒸汽影响后，垢层可能呈现疏松、多孔或不均匀堆积状态^[1]。垢层厚度沿叶高方向分布不一致，会改变原有叶型轮廓，造成流道收缩程度不同，进而破坏蒸汽速度三角形和级间流量分配，增加局部涡流及冲击损失。

1.3 运行参数异常变化规律

通流部分结垢后，机组运行参数会呈现连续性偏移特征。调节级压力通常逐步升高，相同负荷下主蒸汽流量增加，级间压力分配偏离设计值，排汽压力及抽汽参数也可能出现异常波动。叶片表面粗糙度上升后，蒸汽流动阻力增大，级效率降低，机组热耗率和汽耗率随之上升。流道局部堵塞会引起轴向推力重新分配，使推力瓦温度、轴位移及振动值发生变化。参数变化初期幅度较小，但长期趋势具有较强关联性，需要结合负荷、温度、压力和流量数据进行多维比对，避免将结垢误判为阀门、汽封或测量系统故障。

2 结垢引发通流性能劣化问题

2.1 有效流道面积缩减问题

垢层持续附着于喷嘴、静叶及动叶表面后，会占据原有蒸汽通道空间，使喉部截面积和叶栅间隙逐步减小。流道收缩会抬高局部蒸汽流速，增大压降与节流损失，破坏设计工况下的流量匹配关系。负荷保持不变时，调节阀开度和进汽量往往需要同步增加，造成单位出力耗汽量上升。不同级段结垢程度存在差异，还会形成流量分配不均，使局部叶片承受更高冲击载荷，限制通流能力和机组经济运行水平。

2.2 叶型粗糙引起流动损失

垢层覆盖叶片表面后，原有光滑叶型被颗粒状、片状沉积结构替代，边界层发展状态随之改变。粗糙表面会增强蒸汽与金属壁面的摩擦作用，使边界层提前增厚并发生分离，叶片吸力面附近容易形成回流区和尾迹扩散^[2]。蒸汽流向偏离设计角度后，进口冲角和出口速度方向产生误差，型面损失、二次流损失及尾缘损失同步增加。能量在无效涡流和局部扰动中持续耗散，导致级内焓降利用不足，叶片做功能力和通流效率明显下降。

2.3 级间参数偏移加剧漏汽

结垢造成各级通流能力不一致后，级间压力、温度和反动度会偏离原有匹配状态。前级流道受阻可能引起级前压力升高，后级蒸汽流量不足则导致压比分配失衡，使隔板汽封、叶

顶汽封及轴端汽封两侧压差发生变化。压差增大会推动更多蒸汽绕过有效叶栅通道,形成径向或轴向漏汽,减少参与膨胀做功的有效流量。漏汽还会扰乱主流速度场,扩大级间掺混损失,并对轴向推力、转子稳定性和局部温度分布产生不利影响。

3 结垢造成机组效率损失机理

3.1 级效率下降抬升热耗率

结垢使喷嘴和叶片型面偏离设计轮廓,蒸汽膨胀过程中的速度转换与能量传递关系受到破坏。局部流道阻力增大后,蒸汽在叶栅内产生附加压降,部分焓降被摩擦、涡流及尾迹损失消耗,实际做功量低于理论值。叶片进口角和出口角发生偏移,还会导致冲角损失扩大,使级内有效焓降利用率持续下降。为维持既定负荷,机组需要增加主蒸汽流量或提高调节阀开度,单位发电量对应的蒸汽消耗随之增加。结垢程度较重时,各级效率下降具有叠加效应,热力循环中的能量转换链条被削弱,汽耗率、热耗率和煤耗水平同步升高,偏离节能降耗和精益运行要求。

3.2 蒸汽流量受阻限制出力

垢层占据叶栅通道并缩小喉部面积后,通流部分的最大流量能力明显降低。主蒸汽进入汽轮机后难以按照设计流量顺利通过各级,局部区域容易出现流速突增、压力积聚和流量重新分配现象。高负荷工况下,调节阀即使保持较大开度,后续级段仍可能因通流受限无法获得足够蒸汽,导致有效做功流量不足。流量受阻还会改变各级焓降分配,使部分级段负荷偏高,部分级段膨胀不足,整体出力增长受到抑制^[3]。机组长期处于受限状态时,负荷响应速度下降,调峰能力和运行灵活性减弱,难以适应宽负荷、高效率运行要求,并可能造成主蒸汽参数与发电功率之间的匹配偏差持续扩大。

3.3 轴向推力异常影响稳定运行

结垢引起级间压力重新分配后,转子各级叶轮两侧的压差关系随之改变,原有轴向力平衡状态被打破。前级通流受阻会使级前压力升高,后级流量下降则可能造成压力梯度集中,轴向推力出现持续偏移。推力变化超过正常调节范围时,推力瓦承载加重,瓦块温度和磨损程度上升,轴位移参数也可能接近报警限值。局部结垢不均还会造成周向受力差异,使转子受到附加扰动力,振动幅值及相位稳定性下降。轴向推力异常若与汽封间隙变化、转子热膨胀叠加,容易加剧动静部件摩擦风险,影响轴系安全。建立推力、轴位移、瓦温及级间压力的关联监测机制,可提升结垢异常的识别精度。

4 结垢问题分级治理技术路径

4.1 强化蒸汽品质全过程控制

蒸汽品质控制应覆盖补给水、凝结水、给水、锅炉汽水系统及主蒸汽输送全过程,形成源头削减、过程阻断、末端验证

相衔接的治理链条。水处理环节需要稳定除盐系统运行参数,严格控制电导率、硅含量、钠离子及铁铜腐蚀产物,避免杂质进入热力系统后发生富集。凝汽器泄漏、加热器疏水异常及管道腐蚀会增加盐类和金属氧化物负荷,应依托在线仪表、定期化验和趋势分析及时识别水质偏离。锅炉运行期间需协调排污率、汽包水位、蒸汽带水及汽水分离状态,防止机械携带和选择性携带加重叶片沉积。主蒸汽管道、再热系统及减温水系统还应控制内部锈蚀和杂质迁移,降低启停阶段污染物集中进入汽轮机的概率。构建水汽品质分级预警标准,将单点超限转变为浓度、持续时间、变化速率和运行工况综合判定,并将异常信号联动至负荷调整、排污优化和取样复核流程。检修后冲洗、启动前水质验收及并网后的高频监测也需纳入闭环管理,保证蒸汽品质处于稳定受控状态,从源头减缓通流部分结垢速度。

4.2 建立多参数结垢诊断模型

多参数结垢诊断模型需要以通流热力特性和历史运行数据为基础,将调节级压力、主蒸汽流量、级间温度、抽汽压力、热耗率、轴位移、推力瓦温度及振动等变量纳入统一分析框架。数据处理阶段应完成负荷归一化、环境修正、仪表偏差校验和异常值剔除,消除工况波动对诊断结果的干扰。模型构建可结合设计工况基准、同负荷性能曲线和设备劣化趋势,提取反映流道收缩、级效率下降及压比分配偏移的特征参数。单一参数变化容易受到阀门开度、真空变化和汽封状态影响,因此需要设置参数相关性矩阵,对压力升高、流量增加、热耗恶化及轴向推力变化进行联合判别。诊断结果可划分为轻度沉积、中度堵塞和重度结垢等级,并为不同等级配置监测频率、负荷控制和清洗方式。引入数字孪生和动态基线理念后,可根据检修记录、清洗效果及运行反馈持续修正阈值,使模型适应机组老化和季节工况变化^[4]。诊断界面还应展示趋势斜率、异常持续时间和风险区间,避免依赖瞬时数值作出判断,从而提升结垢定位、程度识别和治理决策的准确性。

4.3 实施在线清洗及停机除垢

在线清洗适用于结垢程度较轻、通流能力尚未明显受限且机组运行参数保持稳定的阶段,实施重点是合理控制清洗介质、喷入位置、流量、温度和持续时间,避免对叶片材料、汽封间隙及排汽湿度产生不利影响。清洗前应核对垢层成分、沉积部位和机组负荷,制定参数边界及异常退出条件,清洗过程中连续监测振动、轴位移、级间压力、真空和疏水状态,防止脱落颗粒造成局部冲刷或流道二次堵塞。停机除垢适用于垢层致密、附着牢固、通流面积明显缩减或轴向推力异常的情况,可根据沉积物性质选择机械清理、化学清洗或复合除垢方式。机械处理需要控制工具硬度和接触角度,保护叶片型线、表面涂层及密封结构;化学处理则应校核药剂浓度、温度、反应时间和材料相容性,并设置中和、漂洗及废液处置程序。除垢结束后需开展叶片表面检查、喉部面积复测、汽封间隙测量和转

子动静间隙校核,确认无残留沉积、腐蚀损伤及异物遗留。再启动后应对热耗率、级间压力和轴系参数进行对比验证,将清洗前后数据录入设备健康档案,为后续治理周期优化提供依据。

5 治理实施成效及长效管控机制

5.1 通流能力恢复效果检验

通流能力恢复效果应依据治理前后的主蒸汽流量、调节级压力、级间压差、阀门开度及负荷响应进行综合检验。相同负荷和蒸汽参数条件下,若调节级压力下降、阀门开度减小、单位负荷耗汽量降低,说明叶栅喉部面积和蒸汽通过能力得到恢复。检验过程还需对各级压力分配、抽汽参数和排汽状态进行校核,确认流道阻塞及局部压降已经缓解。轴位移、推力瓦温度和振动趋势应同步纳入评价,防止局部残垢造成受力不均。结合修正后的性能试验数据绘制通流特性曲线,可识别不同负荷区间的恢复程度,为清洗质量验收和后续运行边界调整提供量化依据。

5.2 热耗水平改善程度评价

热耗改善评价应排除环境温度、负荷率、主再热蒸汽参数、凝汽器真空及辅助系统状态等因素影响,对治理前后数据实施同工况修正。评价指标可由汽轮机热耗率、汽耗率、缸效率、级组效率及单位出力蒸汽消耗构成,避免依靠单项参数判断治理成效。结垢清除后,蒸汽流动阻力和附加损失下降,实际焓

降利用程度提高,相同进汽量对应的发电出力应有所增加^[5]。数据分析还需关注不同负荷段的改善差异,识别低负荷节流损失和高负荷通流限制对结果的干扰。建立基准值、目标值和允许偏差相结合的评价体系,可将效率改善转化为可跟踪的技术指标。

5.3 运行维护闭环机制构建

运行维护闭环机制应贯通水汽品质监督、性能监测、异常诊断、分级治理、效果验证和档案更新等环节。日常运行阶段可设置结垢风险指标库,将调节级压力偏差、热耗变化率、级间压比分布及轴向推力趋势纳入预警规则,形成轻微异常跟踪、中度异常干预、严重异常停机处理的分级响应模式。检修阶段需记录垢层位置、厚度、成分和清除难度,并与运行参数变化进行关联分析,持续修正诊断阈值和清洗周期。治理完成后,应将性能试验结果、水汽品质数据及设备状态纳入统一台账,形成可追溯的数据链。依托数字化平台开展趋势预测和维护决策,可推动检修管理由定期处置转向状态评价。

6 结语

通流部分结垢会破坏蒸汽流动状态,降低级效率及通流能力,并引发热耗升高、出力受限和轴向推力异常。强化蒸汽品质控制、参数诊断及分级除垢,可恢复叶片气动性能。建立监测、治理、验证相衔接的闭环机制,能够保持机组高效稳定运行。

参考文献:

- [1] 刘祥允.1000 MW 汽轮机通流部分结垢与清洗技术应用效果分析[J].科技视界,2025,15(35):82-84.
- [2] 王维鹏,郭松林.燃煤电厂汽轮机通流部分结垢处理研究[J/OL].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025,(12):128-131[2026-07-21].
- [3] 刘传亮,郝宁.热电联产机组汽轮机通流部分结垢诊断与分析[J].发电设备,2022,36(6):387-392.
- [4] 汪飞,王华,刘明,等.超超临界汽轮机组通流部分改造后配汽调整仿真研究[J].汽轮机技术,2025,67(5):373-378.
- [5] 毕琨.低压饱和蒸汽轮机的结构设计[J].大众科学,2025,46(12):56-58.